



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Mecanismo de acción de diversas técnicas remediadoras de
contaminantes orgánicos persistentes en el suelo: Revisión
Sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORA:

Serrano Vera, Abigail Marilu (0000 0002 1582 4446)

ASESOR:

Dr. Lozano Sullca, Yimi Tom (0000 0002 0803 1261)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por darme las fuerzas necesarias para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados y será el inicio de mi vida profesional y posteriores vivencias en el campo laboral. A mis queridos padres, por su amor, trabajo, apoyo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes pude lograr llegar hasta aquí y convertirme en todo lo que soy. Ha sido un gran orgullo y privilegio de ser su hija.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres: Marilu Vera Cardenas , Lucio Serrano Sanchez por ser los principales promotores de este sueño, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me inculcaron. Agradezco a mi pareja Diego por apoyarme siempre en mis metas.

INDICE DEL CONTENIDO

CARATULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vv
ÍNDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Tipo y diseño de investigación	17
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	17
3.3. Escenario de estudio.....	19
3.4. Participantes	19
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	19
3.6. Procedimiento	19
3.7. Rigor científico	21
3.8. Método de análisis de información	22
3.9. Aspectos éticos.....	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
V. CONCLUSIONES	34

VI. RECOMENDACIONES.....	35
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Estudios computacionales que utilizaron descriptores moleculares para la estimación de parámetros de remediación relevantes para diversas tecnologías de remediación

Tabla N°2: Antecedentes de las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo

Tabla N° 3: Matriz de categorización apriorística

Tabla N°4: Tipos de técnicas remediadoras de COPs

Tabla N°5: Mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras

Tabla N°6: Beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Contaminantes orgánicos persistentes

Figura N°2: Agrupación de contaminantes orgánicos persistentes

Figura N°3: Categorización de tecnologías para la remediación in situ de suelos y sedimentos contaminados con contaminantes orgánicos

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1: Diagrama de procedimiento de recolección

Gráfico N°2: Porcentaje de técnicas remediadoras más empleadas

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PAHs: Policíclicos

PCBs: Bifenilos policlorados

PCDDs: Dibenzo-p-dioxinas policloradas

PCDFs: Dibenzofuranos policlorados

COPs: Compuestos orgánicos persistentes

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar cuál es la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo para lo cual se siguió una metodología cualitativa, de tipo aplicada; mediando el cual se hizo una recolección de 140 literaturas, quedando seleccionadas en el estudio 23 que cumplieron con los criterios planteados.

Obteniendo que, las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo son la adsorción física, la oxidación reducción química y la biorremediación; presentando entre las técnicas la oxidación / reducción química y la adsorción física mayor utilización entre los autores, siendo empleado en un porcentaje del 35% cada una, mientras que la biorremediación fue usado por el 30%. El mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo son: en la biorremediación, es la descomposición a través de microorganismo; en el caso de la oxidación - reducción química los mecanismos de acción son los procesos de oxidación avanzados (AOP), la dechloración y oxidación química; por último el mecanismo de acción de la técnica de remediación de adsorción física es la adsorción de los COPs mediante adsorbentes generalmente carbón activado, lo cual permiten una eliminación sostenible. Los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo son de acuerdo a los costos, al tiempo que se emplee para llevar a cabo la eliminación de COPs, al acceso de su aplicación y al manejo, donde todas las técnicas presentan resultados eficientes para compuestos orgánicos; pero la variación se encuentra en los costos y el tiempo de empleo, siendo entre todas la biorremediación la más completa en cuanto a las sub categorías mencionadas.

Palabras clave: Mecanismo de acción, técnicas, remediación, contaminantes orgánicos, contaminantes persistentes, suelo.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the influence of the different remediation techniques for persistent organic pollutants in soil, for which a qualitative methodology of applied type was followed; through which a collection of 140 literatures was made, being selected in the study 23 that complied with the proposed criteria.

It was found that the most widely used remediation techniques for persistent organic pollutants in soil are physical adsorption, chemical oxidation/reduction and bioremediation; among the techniques, chemical oxidation/reduction and physical adsorption are the most widely used by the authors, being used in a percentage of 35% each, while bioremediation was used by 30%. The mechanism of action of the various remediation techniques for persistent organic pollutants in soil are: in bioremediation, it is decomposition through microorganisms; in the case of chemical oxidation - reduction, the mechanisms of action are advanced oxidation processes (AOP), dechlorination and chemical oxidation; finally, the mechanism of action of the physical adsorption remediation technique is the adsorption of POPs by means of adsorbents, generally activated carbon, which allows for sustainable elimination. The benefits of each remediation technique for persistent organic pollutants in soil depend on the costs, the time used to eliminate POPs, the accessibility of its application and management, where all the techniques show efficient results for organic compounds; but the variation is found in the costs and time of use, being bioremediation the most complete among all of them in terms of the subcategories mentioned.

Key words: Mechanism of action, techniques, remediation, organic pollutants, persistent pollutants, soil.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo por contaminantes orgánicos persistentes (COP) es un problema que enfrentan muchos países como resultado de la rápida industrialización (Saber Nima et al., 2018, p.2).

Estos contaminantes orgánicos persistentes (COP) son sustancias tóxicas muy resistentes a la degradación ambiental, que se han convertido en una parte importante de la contaminación del suelo (Wilson Jodie et al., 2016, p.1). Tienen resistencia al fotólisis, a la descomposición química y a la degradación biológica (Colino Clara I. et al., 2021, p.1).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), los bifenilos policlorados (PCBs), las dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDDs) y los dibenzofuranos policlorados (PCDFs) son COPs que se encuentran comúnmente en el medio ambiente terrestre (Sánchez Virtudes et al., 2019, p.2). Estos COP presentan cuatro características, entre las que se encuentran su alta toxicidad (algunos COP son disruptores endocrinos y pueden ser neurotóxicos o inmunosupresores) (Shan Yongping et al., 2020, p.1). Su acumulación biológica persistente (debido a su naturaleza lipofílica, los alimentos contaminados se acumulan fácilmente en el tejido graso del cuerpo cuando son ingeridos por los seres humanos o los animales), su migración a larga distancia (los COP pueden ser transportados en la atmósfera a corta y larga distancia en forma gaseosa o de partículas) y su persistencia (Sandu Ciprian et al., 2017, p.1).

Este almacenamiento en el tejido graso permite que los compuestos se conserven en los organismos vivos, que tienen una baja tasa metabólica (Yu Jie et al., 2019, p.3). El coeficiente de distribución alcohol n-octilo/agua (K_{ow}) es la relación entre la concentración de una sustancia química en la fase n-octilo y en la fase acuosa, lo que constituye un buen indicador de la lipofilia de muchos COP (Tsakiroglou Christos et al., 2016, p.3).

En el ser humano, los COP al ser sustancias químicas lipofílicas pueden bioacumularse en los tejidos ricos en grasa a través de las membranas de los biofosfolípidos. Como resultado, los COP pueden acumularse en la cadena alimentaria (Ashraf Muhammad A., 2017, p.3). Muchos estudios han demostrado que muchas partes del mundo están contaminadas con COP siendo Yadav Ishwar et al., (2016, p.3), demostraron que todas las zonas ambientales de la India están

contaminadas con plaguicidas orgánicos persistentes por encima del límite máximo de residuos límite de residuos.

De acuerdo con Li Jun et al., (2016, p.4), en su estudio analizando la de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo superficial del distrito petroquímico de YanShan en Pekín La concentración de PPAHs osciló entre 35,29 y 6120,22 ng/g con una concentración media de 906,11 ng/g; los plaguicidas organoclorados (PCO) variaron de 4,13 a 7215,24 ng/g con una media de 336,13 ng/g, y los PPCB oscilaron entre 2,21 a 4008,47 ng/g con una media de 486,12 ng/g. Por estos motivos el estudio de las técnicas de remediación de los COP se ha convertido en un tema importante (Rocha I. et al., 2019, p.1).

Debido a ello, se han investigado ampliamente varias técnicas para la remediación de los COP en el suelo, incluyendo la remediación física, la remediación química química, la biorremediación y las tecnologías unificadas (Song Biao et al., 2017, p.2).

Donde técnicas como la remediación electrocinética (EK) ha demostrado ser una tecnología prometedora para la remediación de la contaminación orgánica en el suelo, especialmente adecuada para la remediación de suelos de baja permeabilidad (Gafood Abdul et al., 2021, p.3).

Por tal motivo se plantea el siguiente problema general: ¿Cuál es la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo?, de igual manera los siguientes problemas específicos son:

PE1: ¿Cuáles son las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo?

PE2: ¿Cuál es el mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo?

PE3: ¿Cuáles son los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo?

Del mismo modo se plantea el siguiente objetivo general: Determinar cuál es la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo; y como objetivos específicos:

OE1: Definir cuáles son las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo.

OE2: Analizar cuál es el mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.

OE3: Identificar cuáles son los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.

El presente estudio se justifica teóricamente, con la recolección de literaturas actualizadas de diversas partes del mundo enfocándose en los mecanismos de acción de diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo, con la finalidad de ampliar los conocimientos científicos a nuevos investigadores mostrando cuales son las técnicas remediadoras que presentan un mejor efecto sobre el tratamiento de eliminación de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.

II. MARCO TEÓRICO

Desde la Segunda Guerra Mundial, los científicos han identificado ciertos contaminantes químicos que presentan características tóxicas y son persistentes en el medio ambiente, bioacumulables, son propensos a la migración atmosférica transfronteriza de largo alcance y deposición, y se espera que impongan efectos graves para la salud de los seres humanos, la fauna y la biota marina adyacente y distantes de su origen de emisión (Kallawar G. et al., 2021, p.1). Estos contaminantes químicos se denominan contaminantes orgánicos persistentes (COP) (Antunes I. et al., 2016, p.2).

Los COP tienen una larga vida media en los suelos, los sedimentos, el aire y la biota (Abujabhah Ibrahim S. et al., 2016, p.2). No existe consenso sobre la duración de la vida media en un determinado para que se aplique la palabra "persistente"; Sin embargo, la vida media de un COP puede ser de años o décadas en el suelo/sedimento y de varios días en la atmósfera (Agnello Ana C. et al., 2016, p.2).

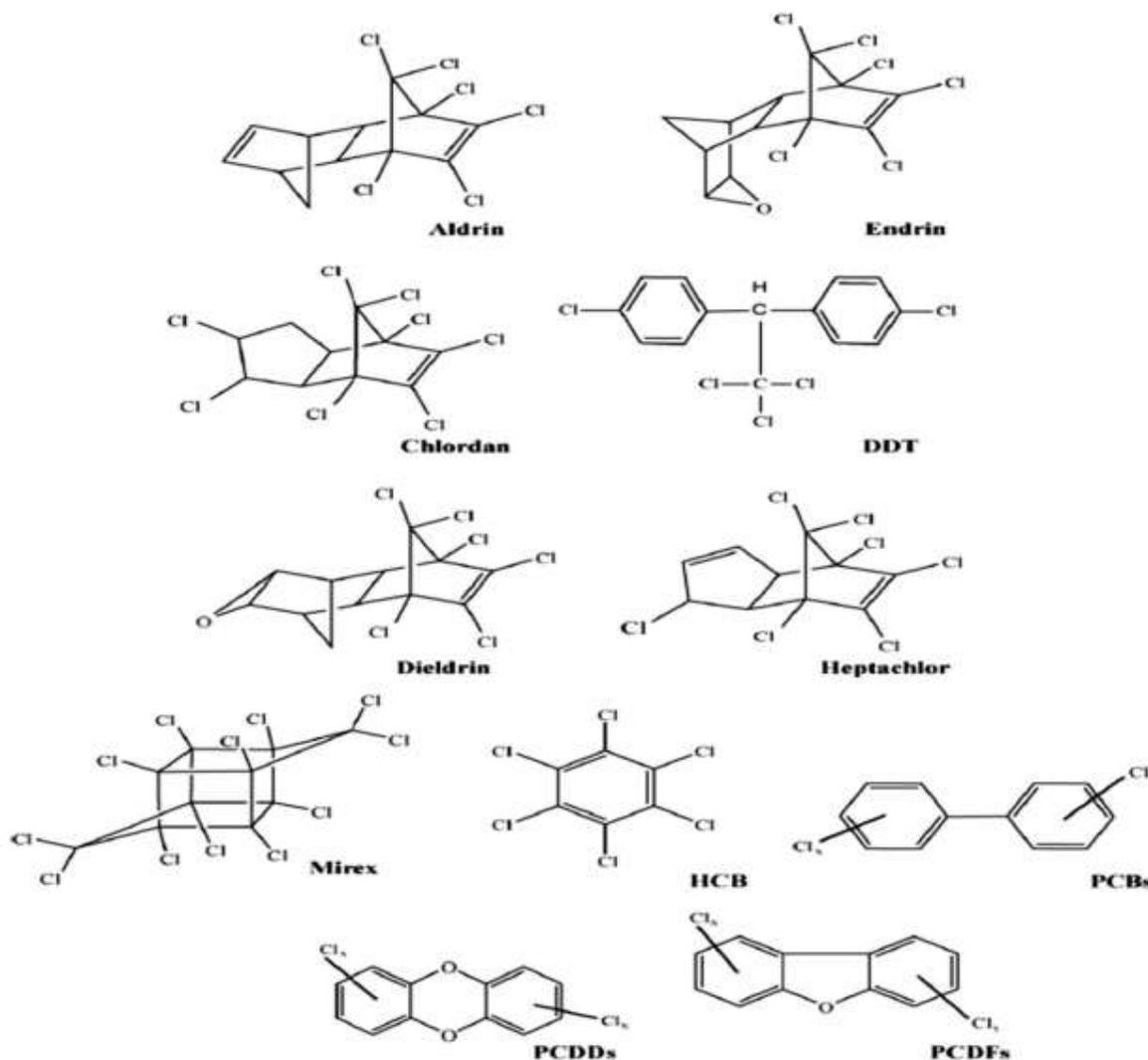
Debido a ello, los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son sustancias tóxicas, altamente resistentes a la degradación ambiental, que pueden bioacumularse y tienen un potencial de transporte atmosférico a largo plazo (Rahman N. et al., 2019, p.3).

La contaminación del suelo por contaminantes orgánicos persistentes (COP) es un problema que enfrentan muchos países como resultado de la rápida industrialización (Adhikari S. et al., 2016, p.2). Es así que, en el Convenio de Estocolmo 2001 del PNUMA (PNUMA 2001) las legislaturas de 92 repúblicas aprobaron el Convenio de Estocolmo de Estocolmo sobre los COP para disminuir y/o erradicar el vertido de 12 únicas sustancias COP; estas sustancias se conocen como la "docena sucia" o los "contaminantes orgánicos persistentes" (Vickers N., 2017, p.2).

Por ejemplo, se han identificado 209 grupos diversos de bifenilos policlorados; se diferencian entre sí por el nivel de cloración y la posición de sustitución (Teunen Lies et al., 2021, p.3). El enlace carbono-cloro es muy estable a la hidrólisis y un mayor número de sustituciones de cloro y/o grupos funcionales conducen a una mayor resistencia a la degradación biológica y fotolítica (Zhong Wenjue et al., 2019, p.4).

Dado que los COP se descomponen se descomponen muy lentamente, estarán presentes en el medio ambiente durante mucho tiempo, incluso si se eliminan inmediatamente todas las nuevas fuentes de inmediato. Se muestra en la Figura N°1, algunas de las estructuras químicas de los contaminantes orgánicos persistentes.

Figura N°1: Contaminantes orgánicos persistentes



Fuente: Ashraf Muhammad A., 2017

Los COP son recalcitrantes en todos los componentes del medio ambiente; pasan al aire desde diversas fuentes industriales (por ejemplo, plantas incineradoras, centrales eléctricas y centrales de calefacción), los hornos domésticos, la volatilización de las superficies de agua y el suelo, el transporte a los vertederos y el consumo de aerosoles agrícolas (Schweitzer L. y Noblet J., 2018, p.2). Con origen en diversas actividades antropogénicas (es decir, industria, agricultura, productos secundarios de

la combustión), los contaminantes pueden terminar en el medio ambiente a través de descargas, lixiviación, erosión y deposición atmosférica (Belpaire C. et al., 2020, p.2).

Otras fuentes de contaminantes COP incluyen la generación no premeditada resultante de amenidades químicas, incineración, procesos de combustión variados como los incendios forestales y la descomposición de residuos que contienen PCB. Como se ve en la Figura N°2.

Figura N°2: Agrupación de contaminantes orgánicos persistentes



Fuente: Modificado de Andrade De. Et al., 2020

Como se observa en la figura N°2 los COPs pueden generarse a partir de diversas actividades y resultar en varias zonas.

El consumo de aceite obsoleto, la fijación y reparación de herramientas, la destrucción de edificios, la fabricación de cemento, la evaporación, la quema de la ignición de carbón, la lixiviación de vertederos y las acciones de reprocesamiento son otras causas de generación de COPs (Babut Marc et al., 2020, p.3). También está la incineración municipal, los residuos terapéuticos, las plantas de plaguicidas organoclorados, las plantas industriales de cloro-álcali, las plantas de aluminio secundario, las plantas de producción de coque de horno y fundición, los lodos de depuradora, los residuos peligrosos/plásticos en vertederos, la estiba de plaguicidas organoclorados y la estiba de cenizas volantes (Catteau Audrey et al., 2021, p.1).

En la actualidad, la mayoría de los plaguicidas que se utilizan en los campos agrícolas son compuestos orgánicos sintéticos que pueden pasar al suelo sin llegar a su objetivo previsto, a través de la escorrentía superficial y subsuperficial de los cultivos tratados o por derrames durante la superficie de las plantas tratadas o por derrames durante la aplicación (Awad Abdelrahman M. et al., 2019, p.3).

Así mismo, la disipación de los plaguicidas químicos en el suelo depende de las características del mismo, de la naturaleza del compuesto químico, el sistema de cultivo, el patrón de riego y las condiciones climáticas del entorno (Angeles Luisa F. y Aga Diana S., 2020, p.5).

La naturaleza lipófila e hidrófoba de los COP significa que una vez que ingresan a un sistema biológico no se excretan fácilmente (Zahn D. et al., 2016, p.3). En los sistemas biológicos, los COP tienden a dividirse en lípidos, lo que da como resultado la acumulación de COP en los órganos y el tejido adiposo; con el tiempo, los COP se acumulan (bioacumulación) en el tejido vivo del organismo (Pochodylo O. y Helbling D., 2017, p.7).

La biomagnificación es el aumento de la concentración de COP a medida que los materiales contaminados (plantas y animales) pasan por los niveles tróficos de la cadena alimentaria (Adetona O. et al., 2017, p.2). Además, como pueden bioacumularse y magnificarse en la cadena alimentaria, la preocupación se centra en los impactos sobre los principales depredadores, incluidos los humanos (Engelsman S. et al., 2020, p.3).

A causa de la exposición a los COP se ha asociado a efectos adversos en animales, como alteración del desarrollo neuroconductual, deterioro de la memoria y el aprendizaje y la alteración de las proteínas neuronales implicadas en la formación y el crecimiento de las sinapsis (Loreto Gómez C. et al., 2018, p.3). Otros efectos son la hipertrofia hepática, la alteración de las enzimas hepáticas, hepatomegalia y tumores, problemas de desarrollo en las crías de roedores expuestas en el útero y pruebas de alteraciones endocrinas (Loreto Gómez C. et al., 2017, p.6).

Se ha informado sobre el potencial de alteración endocrina, así como sobre otros efectos nocivos de los COP en los seres humanos (Matthies Michael et al., 2016, p.2). Es importante destacar que los estudios han demostrado que los COP pueden atravesar la placenta y acumularse en el feto (Wilson Jodie et al., 2016, p.3). La

exposición prenatal a los COP se ha asociado con efectos sobre el peso al nacer, la duración del embarazo, la memoria visual, el deterioro de la función inmunitaria y un mayor riesgo de infecciones del oído medio (USEPA, 2016, p.2).

Además, los bebés están expuestos a los COP a través de la lactancia materna (Pozo Karla et al., 2017, p.3). Esto implica que están expuestos antes del nacimiento y durante las primeras etapas sensibles del desarrollo de sus vidas a los COP y el potencial de alteración endocrina de los COP en los seres humanos (Amber Mazia et al., 2021, p.2).

Los animales y los seres humanos están expuestos a mezclas de contaminantes orgánicos persistentes; por lo tanto, investigar las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se ha vuelto una lucha de diversos estudios (Wilson Jodie et al., 2016, p.1).

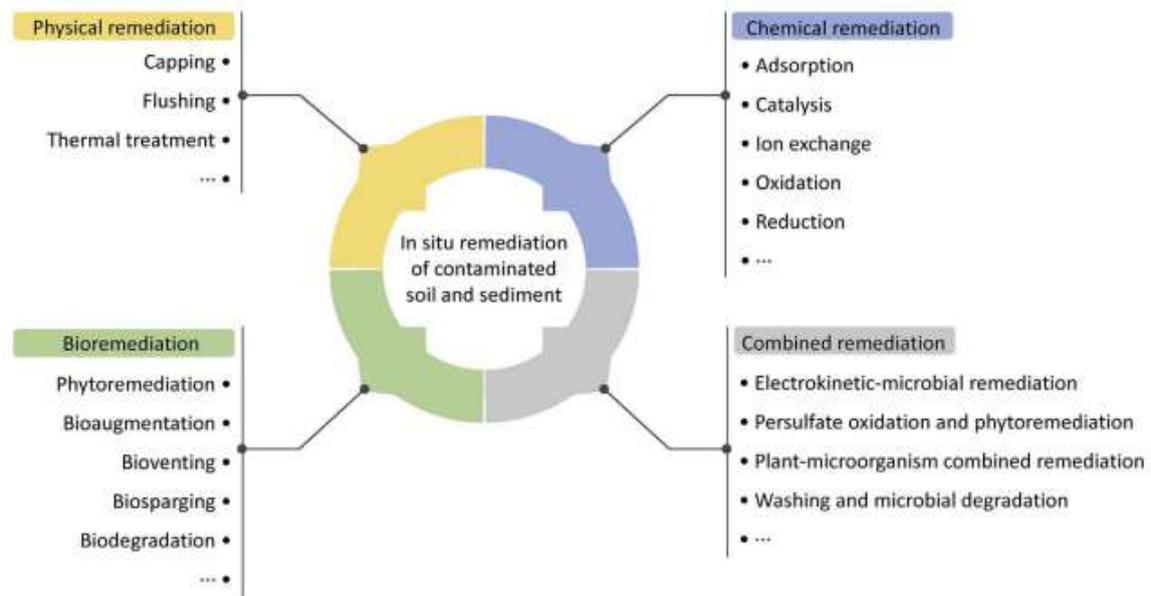
Debido a ello, se han investigado ampliamente varias técnicas para la remediación de los COP en el suelo, incluyendo la remediación física, la remediación química, la biorremediación y las tecnologías unificadas (Chakraborty J. y Das S., 2016, p.4).

Pero, en general, las tecnologías de remediación pueden clasificarse en dos estrategias principales: remediación in situ y remediación ex situ. La remediación in situ es el tratamiento del contaminante en el lugar original (Gnana S. et al., 2021, p.301). Esta estrategia tiene como objetivo la eliminación del contaminante del suelo o del sedimento sin mover el suelo o el sedimento en sí. La remediación ex situ se lleva a cabo mediante la excavación y el tratamiento del suelo o sedimento contaminado en otro lugar fuera del sitio (Vincent S. et al., 2021, p.4).

Durante las últimas décadas, se han desarrollado rápidamente muchas tecnologías para la remediación in situ de suelos y sedimentos contaminados (Zoppini Annamaria et al., 2020, p.245).

Estas tecnologías incluyen métodos de remediación físicos, químicos, biológicos y combinados como se muestra en la figura N°3

Figura N°3: Categorización de tecnologías para la remediación in situ de suelos y sedimentos contaminados con contaminantes orgánicos



Fuente: Samadi Aryan P. et al., 2021

Comparando estas dos estrategias, la remediación in situ ofrece una serie de posibles ventajas técnicas, económicas y medioambientales (Kuppusamy et al., 2016, p.4). En algunos casos, la remediación in situ es el único medio de eliminación de contaminantes si se tiene en cuenta la escala del área contaminada y la rentabilidad (Yu Gui et al., 2017, p.3). Para una gran escala de suelo o sedimento contaminado, la remediación in situ es atractiva porque causa menos perturbaciones al ecosistema, la operación es relativamente sencilla, y el coste es más barato que el tratamiento ex situ (Su Zhinguo et al., 2018, p.2).

La remediación física es el proceso de reversión o detención de daño al medio ambiente utilizando tecnologías físicas como como el taponamiento, el lavado, el tratamiento térmico, etc (Wang Dali et al., 2020, p.4).

La cobertura in situ consiste en colocación de una cubierta de material limpio o aislante adecuado sobre el suelo o sedimento contaminado (Wang Y. y Tam N., 2019, p.1). Las funciones principales de este método aislamiento físico, la estabilización de los lugares contaminados y la reducción del transporte de contaminantes (Wagner Michael et al., 2021, p.4). Para algunos sitios contaminados con contaminantes orgánicos persistentes el lavado puede ser un método rápido y eficaz (Huang Z. y Lee H., 2016, p.3).

El lavado in situ es una tecnología para la limpieza de contaminantes mediante el bombeo de agentes de lavado de lavado en la capa inferior del suelo o los sedimentos (Liu Shuting et al., 2021, p.5). Una mezcla de agua Una mezcla de agua y tensioactivos suele aplicarse para mejorar la solubilidad acuosa de los contaminantes durante el proceso de lavado (Reynaert Eva et al., 2020, p.2).

En el caso de los contaminantes volátiles, suele aplicarse un tratamiento térmico; el tratamiento térmico in situ consiste en calentar el subsuelo para mejorar la movilización, volatilización y destrucción de los contaminantes en el suelo o sedimento (Luo Jin et al., 2016, p.3). Los métodos de calentamiento incluyen principalmente el calentamiento conductivo, el calentamiento eléctrico resistivo, el calentamiento a base de vapor y el calentamiento por radiofrecuencia (Samaksaman et al., 2016, p.3). A veces, el proceso de calentamiento es asistido con chorro de aire para acelerar la volatilización de contaminantes (Barot M. y Kumar N., 2021, p.11).

El destino ambiental de los contaminantes orgánicos también puede afectar en gran medida la selección de tecnologías de remediación apropiadas (Chen C. y He J., 2018, p.4). Por lo general, se seleccionan diferentes estrategias de remediación en función de la fase ambiental (suelo, sedimentos, aguas subterráneas, emisiones atmosféricas, etc.) donde se produce la contaminación (Payne Rayford B. et al., 2019, p.2).

Debido a ello en la última década, se han desarrollado modelos de estimación QSAR / QSPR más complicados para la estimación de propiedades fisicoquímicas de contaminantes persistentes y emergentes (Yuan Jntao et al., 2016, p.2). Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes emergentes proporcionan información útil que puede orientar el diseño de tecnologías de remediación (Kucharzyk Katarzyna H. et al., 2017, p.2). Estas propiedades fisicoquímicas se pueden utilizar cualitativamente en el diseño de tecnologías de remediación eficientes (Reddy A. et al., 2019, p.5).

Varios estudios computacionales han intentado determinar parámetros relevantes en el proceso de remediación utilizando modelos QSAR / QSPR (Luo Shuang et al., 2017, p.7). De acuerdo a ello, los estudios de modelos se resumen en la Tabla N°1

Tabla N°1: Estudios computacionales que utilizaron descriptores moleculares para la estimación de parámetros de remediación relevantes para diversas tecnologías de remediación

Contaminante (s)	Parámetro de remediación	Modelos desarrollados	Calidad	Método (s) de remediación pertinente
HOCl persistente	Constante de tasa de deshalogenación (k)	24 modelos recopilados Por ejemplo: $\log k (d^{-1}) = -1,6957 E_{LUMO} (eV) - 3,1415$	$R^2 = 0,42 - 0,99$	Reducción por nZVM, reducción química, fotodegradación, deshalogenación biológica
PBDE fenoxifenoles organoclorados	Vida media de degradación fotoquímica ($t_{1/2}$)	$\log (1 / t_{1/2}) = -6,13 (GAP-1) + 23,22 (Q_{hal-}) + 0,04 (TPSA) - 29,21 (Rad-super +) + 4,18 (LUMO +) + 28,14$ $\log (1 / t_{1/2}) = 31,67 (Q_{hal-}) + 0,12 (TPSA) - 20,49 (Hal-BL +) + 7,96 (LUMO +) + 0,02 (Hf) + 28,33$	$R^2 = 0,93 - 0,90$	Degradación fotoquímica ex situ, atenuación natural monitoreada
mono-NAC	Constante de tasa de reducción (k_{SA})	$\log k_{SA} = -2,08 - 1,35 \times 10^{-2} \times I_p + 1,48 \times Q_c^- + 1,01 \times 10^{-2} - E_{HOMO} - 1,56 \times E_{LUMO} - 2,11 \times 10^{-1} \times \Delta E - 6,11 \times 10^{-2} \times \mu$	$R^2 = 0,89 - 0,8$	Reducción por carbón activado

			grupo nitro; μ : momento dipolar		
Compuestos aromáticos	Constante de oxidación de ozono (k_{oz})	$-\log k_{oz} = 4.881 + 0.015 CMA - 2.970 E_{LUMO} - 3.397 qH^+ - 0.0260 \mu$	CMA : área molecular de Connolly; qH^+ : carga parcial más positiva en un átomo de hidrógeno	$R^2 = 0,800$	Oxidación de ozono en solución acuosa.
Compuestos orgánicos con α-ciclodextrina	Constantes de inclusión (K_α)	$\log K_\alpha = 1,25 + 2,41 (B03[NO] + 0,0152 (L/B_w) + 0,428 (CATS2D_03_NL) - 0,835 (Mor23u) + 0,333 (E1m) - 0,261 (CATS2D_03_PL) - 0,201 (RDF105m) - 0,283 (MATS6v)$	$B03[NO]$, L/B_w , $CATS2D_03_NL$, $Mor23u$, $E1m$, $CATS2D_03_PL$, $RDF105m$, $MATS6v$: descriptores moleculares DRAGON	$R^2 = 0,857$	Adsorción en ciclodextrina
COP	Factor de bioconcentración por plantas Black Beauty y Gold Rush (BCF_{BBGR})	$p BCF_{BBGR} = 5.519 H4p + 0.092 BV31OH2 + 0.070 W4O + 0.257 Componentes Z - 0.175$ $p BCF_{BBGR} = 5.347 H4p + 0.077 BV31OH2 - 0.017 HB5O - 0.588 \Delta E + 4.969$	$H4p$: descriptores GETAWAY; $BV31OH2$, $W4O$ y $HB5O$::: Descriptores VolSurf; Componente Z: descriptor químico cuántico	$R^2 = 0,940$ $R^2 = 0,921$	Fitorremediación de suelos
AHC	Toxicidad ($EC80$) Biotransformación (inducción)	$\log EC80 = 1.14 \log K_{OW} + 5.76 \log ind = 3.27 - 0.841 \times E_{LUMO}$	-	$R^2 = 0,95$ $R^2 = 0,90$	Biorremediación
N-heterociclos	Biodegradabilidad o no biodegradabilidad por varios mecanismos bioquímicos	Positivo o negativo para cada mecanismo según los fragmentos estructurales utilizados en el modelo	-	$R^2 = N/A$	Biorremediación

Fuente: Luo Shuang et al., 2017

Donde:

- 1) BEHm3: Valor propio más alto n. 3 de la matriz de carga ponderada por masas atómicas
- 2) JGI1: índice de carga topológica media de orden 1
- 3) Lop: índice centrado en Lopping
- 4) GATS8e: Geary autocorrelación de retardo 8 ponderado por Sanderson electronegatividad
- 5) MPC07: recuento de rutas moleculares de orden 7
- 6) nROH: número de grupos hidroxilo
- 7) MLOGP: coeficiente de partición octanol-agua de Moriguchi. (logP)
- 8) ATSC8m: autocorrelación centrada Broto-Moreau del retraso 8 ponderado por masa
- 9) RDF050e: Función de distribución radial - 050 / ponderada por la electronegatividad de Sanderson
- 10)MATS3m: autocorrelación de Moran del retardo 3 ponderado por masa
- 11)RDF040m: Función de distribución radial - 040 ponderado por masa
- 12)Mor14u: señal 14 no ponderada
- 13)SM11_AEA (bo): momento espectral de orden 11 de la estera de adyacencia de borde aumentada. ponderado por orden de fianza
- 14)Mor03u: señal 03 no ponderada
- 15)Todos los grupos de contaminantes orgánicos, incluidos los alifáticos, aromáticos, halogenados, etc.

De acuerdo a la Tabla N°1, se detalla una amplia gama de contaminantes persistentes y emergentes; donde estos estudios incluyen 15 modelos QSAR / QSPR reportados que estiman varios parámetros de remediación relevantes para diferentes métodos de remediación, incluida la reducción química (4 informes) y oxidación (4 informes), adsorción (3 informes), biorremediación (3 informes) y atenuación natural (1 informe). La mayoría de los modelos informados indicaron una calidad estadística aceptable.

Los antecedentes más sobresalientes se detallan algunos de los mecanismos de acción de diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo (Ver tabla N° 2).

Tabla N°2: Antecedentes de las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo

Contaminante (s)	Conc. Inicial (mg / L)	Tiempo de retención (d)	Eliminación (%)	Tasa de eliminación o constante	Tecnología de remediación	Medio / Condición	Autor
Biorremediación							
PCB (Aroclor 1260)	3	8	N / A	15,83 $\mu\text{M.día}^{-1}$	Biorremediación por <i>Dehalococcoides mccartyi</i> CG4	Solución sintetizada enriquecida con frascos de suero de lote PCE / anaeróbico	(Chen C. y He J., 2018)
PCB (Aroclor 1242)	4	21	85	N / A	Biorremediación por un consorcio bacteriano desarrollado	Sedimentos contaminados / Matracas de lotes aeróbicos	(Horváthová H. et al., 2018)
PCB (Aroclor 1260)	73	180	45-63	N / A	Fitorremediación por varias especies vegetales	Suelo contaminado / Envases de plástico para lotes aeróbicos	(Pino N. et al., 2019)
PCB 61	1	180	72,6	$9 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$	Biorremediación electroquímica sinérgica	Sedimento contaminado / Reactor bioelectroquímico discontinuo	(Yu Hui et al., 2017)
Oxidación / reducción química							
PCB	3.2	0,25	80	0,98 h^{-1}	Oxidación química por reacciones de Fenton.	Suelo contaminado / Viales de centrifuga de borosilicato por lotes	(Ma Xiao Hong et al., 2018)
PCB 28	0,5	0,33	98	N / A	Oxidación química por persulfato activado.	Solución sintetizada / Frascos de suero por lotes	(Fang Guo Dong et al., 2012)
PCB 153	5	1	35-45	N / A	Decloración química por ZVI	Solución sintetizada enriquecida con metales pesados / Matracas de tres bocas por lotes	(Lou Yiling et al., 2019)

PCB 52	N / A	5	81,55	N / A	Decloración química por ZVI mediada por tensioactivos	Solución sintetizada que contiene tensioactivos / Viales de vidrio para lotes	(Wu Yingxin et al., 2018)
Adsorción física							
PCB	1,09 mg.kg de sediment o ⁻¹	700	93-97	N / A	Adsorción por carbón activado	Sedimento contaminado / Lote o columnas de vidrio continuas	(Choi Yongju et al., 2014)
PCB (Arochlors 1254 y 1260)	71,4 µg.g suelo ⁻¹	50	64-74	N / A	Adsorción por carbón activado	Suelo contaminado / Tierras a escala de campo	(Denyes Mackenzie et al., 2013)
Biorremediación							
PFOS	4.3	21	10-15	N / A	Fitorremediación por <i>efusiones de Juncus</i>	Medio mineral Hoagland sintetizado / Frascos de polipropileno semi-lote aeróbico	(Zhang Weilan et al., 2019)
PFAS	16-160 mg.kg suelo ⁻¹	90	N / A	0,65-1,4 g. Año ⁻¹ .hectárea ⁻¹	Fitorremediación por varias especies vegetales	Suelo contaminado / Tierras a escala de campo	(Gobelius Laura et al., 2017)
Oxidación / reducción química							
PFAS	0,5	0.3125	80-90	N / A	Oxidación química por persulfato activado.	Sedimentos contaminados / Tubos de centrífuga discontinuos	(Bruton T. y Sedlak D., 2017)
PFAS	10	2	40-90	N / A	Oxidación química por persulfato activado.	Solución sintetizada / Viales de polipropileno por lotes	(Parenky Akshay et al., 2020)
PFAS	0,2	0,042	40-90	N / A	Defluoración química por ZVI	Solución sintetizada / matraces discontinuos	(Arvaniti Olga S. et al., 2016)

PFOA	10	30	30-70	0,091 años ⁻¹	Defluoración química por ZVI y ZVZn	Solución sintetizada / Frascos de HDPE ámbar por lotes	(Blotevogel Jens et al., 2018)
Adsorción física							
PFAS	484,1	0,0042 (6,1 min)	60-80 para PFAS de cadena larga	0.011-0.014 día ⁻¹	Adsorción por carbón activado granular	Solución sintetizada / Columna cilíndrica continua	(McCleaf Philip et al., 2017)
PFAS	0,6 mg.kg ⁻¹	28	70-94	N / A	Adsorción por carbón activado en polvo	Suelo contaminado / Balde de polipropileno por lotes	(Sorengard Mattias et al., 2019)

Elaboración propia

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Este trabajo es una investigación cualitativa, ya que, los estudios cualitativos responden la pregunta del porqué de los fenómenos, y presenta como característica general que los estudios presentan como objetivo explorar y comprender, en lugar de medir fenómenos y comportamientos (Green y Thorogood, 2004, p.1).

Acerca del tipo de investigación, se aplica el tipo aplicada, siendo la investigación aplicada aquella que se enfoca en los comportamientos; objetivo que son muy relevantes para la sociedad y que típicamente revelan relaciones inmediatamente importantes entre el comportamiento y ciertos estímulos (Ceroni Galloso M., 2010, p.4). La investigación aplicada enfocada en el presente estudio pide a los participantes que estudien información nueva, actualizada para su análisis y planteamientos para de solución mediante las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.

En el diseño, se aplicó a la narrativa de tópico, siendo este diseño apropiado para investigación exploratoria de la literatura, que implica objetivos de investigación menos precisos, un enfoque menos sistemático para la inclusión de artículos y que permite obtener conocimientos cualitativos más profundos (Salgado A., 2007, p.73).

Este diseño de investigación es usado ya que se va a enfocar en los sucesos de los mecanismos de acción de diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo; donde se va a exponer mediante la narración los hechos suscitados los investigadores.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Las categorías y sub categorías propuestas y detalladas en la tabla n°3, se elaboraron basándose en los objetivos y problemas específicos, generando 3 categorías y de ellas las sub categorías que permiten generar resultados precisos y ordenados para resolver la problemática tocada.

Tabla N° 1: Matriz de categorización apriorística

PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CATEGORÍAS	SUB CATEGORÍAS	CRITERIO 1	CRITERIO 2
¿Cuáles son las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo?	Definir cuáles son las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo.	Tipos de técnicas remediadoras de COP (Huang Z. y Lee H., 2016, p.3)	<ul style="list-style-type: none"> • Biorremediación • Oxidación / reducción química • Adsorción física • Biorremediación • Oxidación / reducción química • Adsorción física (Pino N. et al., 2019, p.4)	De acuerdo al contaminante presente	De acuerdo a la tecnología usada para la remediación
¿Cuál es el mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo?	Analizar cuál es el mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.	Mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras (Barot M. y Kumar N., 2021, p.11)	<ul style="list-style-type: none"> • Fitorremediación • Biorremediación • Oxidación • Decoloración • Adsorción (Luo Jin et al., 2016, p.2)	De acuerdo a la concentración inicial	De acuerdo al porcentaje de eliminación del COP
¿Cuáles son los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo?	Identificar cuáles son los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo.	Beneficios de cada técnica remediadora (Gobelius Laura et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Por los costos • El tiempo • Fácil acceso • Manejo simple (Wang Dali et al., 2020, p.2)	De acuerdo a los beneficios presentados	De acuerdo a los autores

Fuente: Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio es el lugar donde se realizan los estudios prácticos, debido a ello, al ser este una revisión sistemática se tomará y considerará como escenario a los lugares de campo o laboratorios de universidades en las que se realizan las prácticas de remediación de los COP; siendo estas encontradas y detalladas en los estudios científicos usados.

3.4. Participantes

Los participantes tomados en cuenta para este estudio son primero considerados únicamente artículos científicos, y en segundo punto estos participantes se describen como las fuentes de extracción de literaturas científicas y artículos científicos, estos son bibliotecas virtuales indizados que permiten el acceso a nivel de diversos países del mundo; las fuentes o participantes usadas en esta revisión son: PubMed, Sciencedirect, Scielo y Scopus.

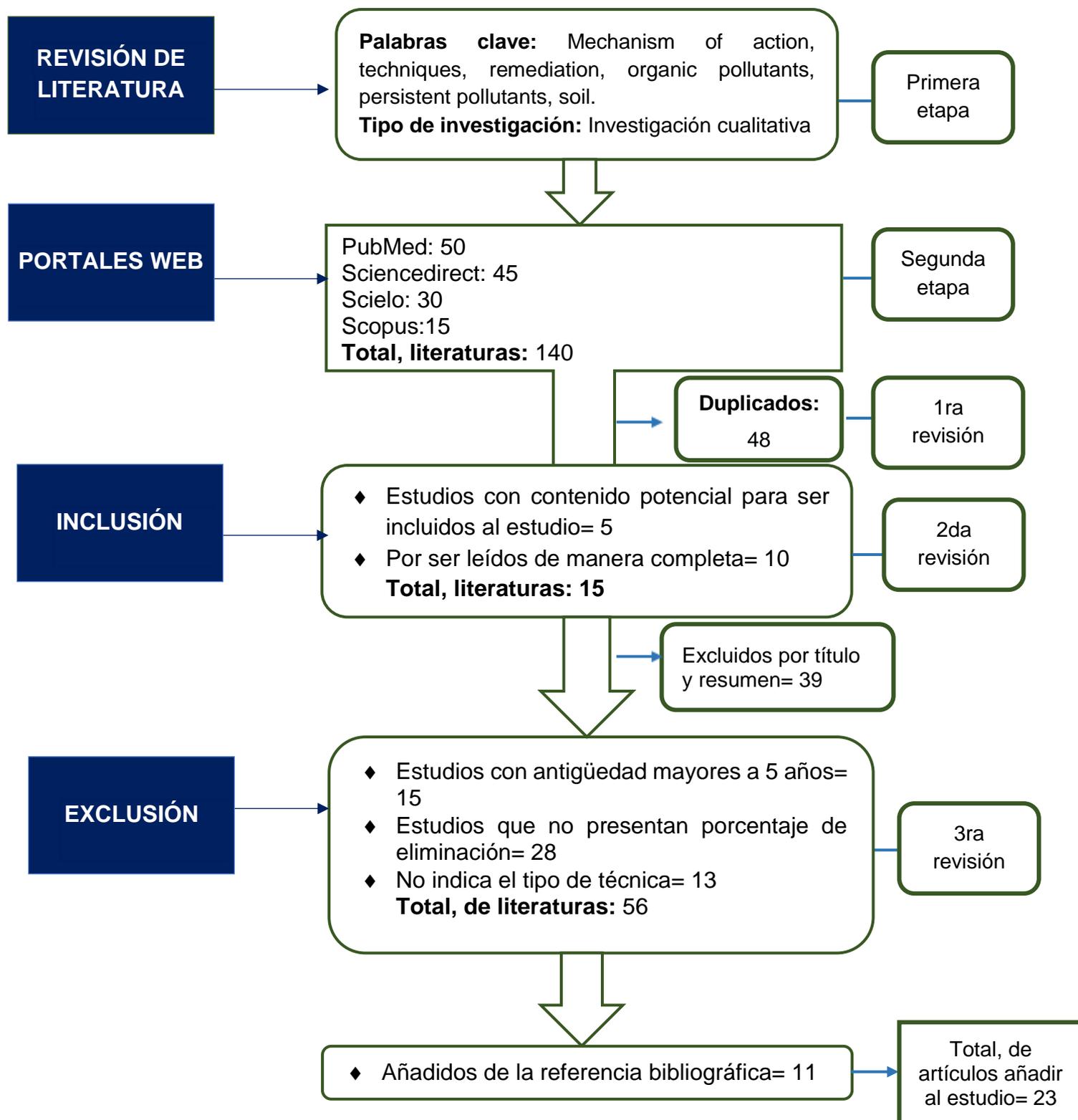
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica usada es el análisis documental, mediante la ficha de recolección. Hernández et al., (2014, p. 415). describe al análisis de documentos como al análisis de literaturas recolectadas, teniendo como objetivo fundamental la objetividad y la síntesis del manifiesto de la información que se va a desglosar.

Debido a ello, la técnica de análisis de contenido es usada para sintetizar los artículos que traten de las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo, para que los lectores puedan tener acceso simple de lo que sería el contenido originar. Esto es posible mediante el uso de la ficha de análisis de contenido, siendo presentada en el anexo n°1, la ficha propuesta, en la cual se detallarán los datos de los documentos originares como: Título, datos de autor (es), datos generales del artículo (pág., año, edicto, doi), objetivo, resultados, conclusión.

3.6. Procedimientos

Gráfico N° 1: Diagrama de procedimiento de recolección



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

Para contar con el rigor científico el presente estudio cumplió con 4 criterios científicos; consistencia, credibilidad, transferibilidad y confirmabilidad (Guba y Lincoln, 1989, pp. 241-243):

el criterio de consistencia señala que se va a obtener cuando varios estudios presentan el mismo resultado; algunos lo denominan convexidad y define a al peso que va a tener un informe mediante el respaldo que otros estudios también obtuvieron llegaron a la misma conclusión. Este criterio se obtiene en el presente estudio mediante la comparación de los resultados y la discusión de diversos autores que aprueban, apoyan y respaldan los resultados finales.

La credibilidad está centrada en el poder y capacidad del lector para comprender y plasmar lo entendido para poder transmitirlo o enseñarlo a otros investigadores desde el punto de vista del participante, siendo también considerado como un mediador, ya que va a codificar la información para el entendimiento general. Este criterio se tiene mediante la información plasmada a lo largo del contenido de este estudio, describiendo de manera objetiva los datos proporcionados, así también exponiendo la cita correspondiente para que no existan indicios de datos alterados.

El criterio de transferibilidad es el nivel en el que los datos de un estudio puedan traspasar a otros así sea presentando otros contextos. Este criterio se genera dejando la información detallada de la metodología usada para que futuros investigadores puedan continuar con la información brindada extendiéndolo a otros contextos.

El criterio de confirmabilidad es la confianza que puede tener un lector con lo leído, para poder utilizarlo y plasmarlo hacia nuevos estudios. Esto se obtiene generando toda la información como la bibliografía de los autores empleados en las citas o los artículos añadidos al estudio, así como las técnicas usadas y cualquier otro tipo de dato esencial que permitan al lector sentirse seguro que la información plasmada es verídica y confiable.

3.8. Método de análisis de información

El método usado para el análisis de la información es la triangulación, de acuerdo con Salgado, A., (2007, Pág. 73), esto implica comparar una serie de teorías para ver cuál explica mejor un conjunto particular de observaciones empíricas. Mediante las técnicas usadas se resalta la matriz apriorística, la cual permitió generar las categorías y sub categorías en base a los objetivos y problemas específicos; siendo las ategorías:

1. Tipos de técnicas remediadoras de COP
2. Mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras
3. Beneficios de cada técnica remediadora

Las sub categorías:

- Biorremediación
 - Oxidación / reducción química
 - Adsorción física
 - Biorremediación
 - Oxidación / reducción química
 - Adsorción física
-
- Fitorremediación
 - Biorremediación
 - Oxidación
 - Decloración
 - Adsorción
-
- Por los costos
 - El tiempo
 - Fácil acceso
 - Manejo simple

3.9. Aspectos éticos

Los aspectos éticos con los que cumplió este estudio fueron la autenticidad, el cual e demostró pasando por el programa anti plagio (turnitin), la calidad, mediante el uso debido de las citas bibliográficas siguiendo la Normativa ISO 690 así como la guía de productos observables de acuerdo con la resolución rectoral N° N° 0089-2019.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la búsqueda de determinar cuál es la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se va a resolver 3 problemas específicos, siendo el primer problema; definir cuáles son las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más usados en el suelo, descritas en la tabla N°4.

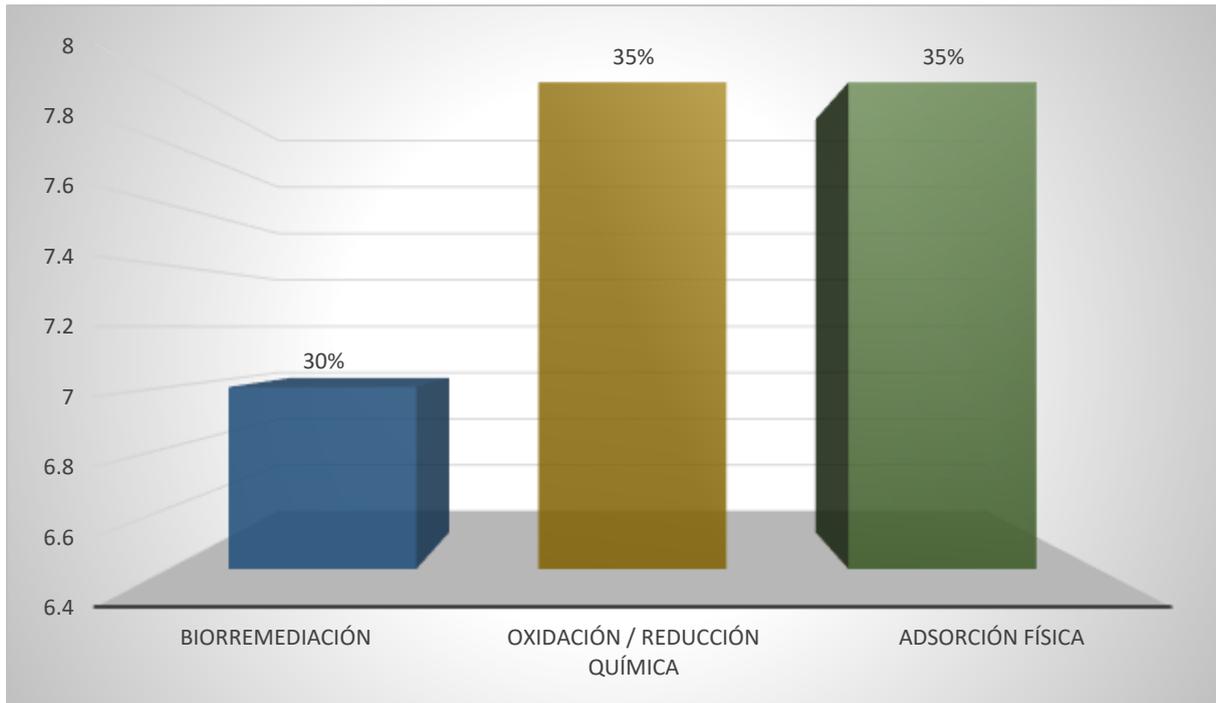
Tabla N°4: Tipos de técnicas remediadoras de COPs

Técnica remediadora	Contaminante (s)	Tecnología de remediación	Autor
Biorremediación	PCB (Aroclor 1260)	Biorremediación por <i>Dehalococcoides mccartyi</i> CG4	(Chen C. y He J., 2018)
Biorremediación	PCB (Aroclor 1242)	Biorremediación por un consorcio bacteriano desarrollado	(Horváthová H. et al., 2018)
Biorremediación	PCB (Aroclor 1260)	Fitorremediación por varias especies vegetales	(Pino N. et al., 2019)
Biorremediación	PCB 61	Biorremediación electroquímica sinérgica	(Yu Hui et al., 2017)
Biorremediación	PCB	Fitorremediación por bioaumentación por cepas libres e inmovilizadas de un consorcio microbiano, utilizando como precursor troncos de aceite de palma y como especies biológicas; plantas de <i>Avena sativa</i> , <i>Brachiaria decumbens</i> , <i>Brassica juncea</i> y <i>Medicago sativa</i> .	(Pino Nancy J. et al., 2016)
Biorremediación	PFOS	Fitorremediación por efusiones de <i>Juncus</i>	(Zhang Weilan et al., 2019)
Biorremediación	PFAS	Fitorremediación por varias especies vegetales	(Gobelius Laura et al., 2017)
Oxidación / reducción química	PCB	Oxidación química por reacciones de Fenton.	(Ma Xiao Hong et al., 2018)
Oxidación / reducción química	PCB 28	Oxidación química por persulfato activado.	(Fang Guo Dong et al., 2012)
Oxidación / reducción química	PCB 153	Decloración química por ZVI	(Lou Yiling et al., 2019)
Oxidación / reducción química	PCB 52	Decloración química por ZVI mediada por tensioactivos	(Wu Yingxin et al., 2018)

Oxidación / reducción química	PFAS	Oxidación química por persulfato activado.	(Bruton T. y Sedlak D., 2017)
Oxidación / reducción química	PFAS	Oxidación química por persulfato activado.	(Parenky Akshay et al., 2020)
Oxidación / reducción química	PFAS	Defluoración química por ZVI	(Arvaniti Olga S. et al., 2016)
Oxidación / reducción química	PFOA	Defluoración química por ZVI y ZVZn	(Blotevogel Jens et al., 2018)
Adsorción física	PCB	Biorremediación por biocarbón, reduciendo la biodisponibilidad y la fito-disponibilidad de los PCBs en el suelo, empleando madera mixta como precursor y como especies biológicas Nabos (<i>Eisenia fétida</i>)	(Silvani Ludovica et al., 2019)
Adsorción física	PFAS	Adsorción por carbón activado granular	(McCleaf Philip et al., 2017)
Adsorción física	PFAS	Adsorción por carbón activado en polvo	(Sorengard Mattias et al., 2019)
Adsorción física	PCB	Adsorción por biocarbón usando como precursor al bambu y como especie biológica a la bacteria (16S rDNA gene)	(Huang Shengyan et al., 2018)
Adsorción física	PCB	Adsorción por carbón activado	(Choi Yongju et al., 2014)
Adsorción física	PCB (Arochlors 1254 y 1260)	Adsorción por carbón activado	(Denyes Mackenzie et al., 2013)
Adsorción física	PCB (52)	Adsorción por biocarbón, usando como precursor mezcla de virutas de madera y como especie biológica <i>Folsomia candida</i>	(Bielská Lucie et al., 2018)
Adsorción física	PCB	Adsorción por biocarbón usando como precursor al pino y como especie biológica a la lombriz <i>Lumbriculus variegatus</i>	(Gomez Eyles J. y Ghosh E., 2018)

Elaboración propia

Gráfico N°2: Porcentaje de técnicas remediadoras más empleadas



Elaboración propia

De acuerdo al gráfico 2 respecto a la tabla 4 se tiene que las técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes más empleados son la adsorción física, la oxidación reducción química y la biorremediación; presentando entre las técnicas la oxidación / reducción química y la adsorción física mayor utilización entre los autores, siendo empleado en un porcentaje del 35% cada una, lo que equivale a 16 investigadores entre ambas, mientras que la biorremediación fue usado por el 30%, siendo 7 autores que lo emplearon. Ello es debido a que ambas tecnologías de remediación se encuentran actualmente desarrolladas para el tratamiento y eliminación de los COPs (Reddy V. et al., 2019, p.3).

Así también, los compuestos orgánicos persistentes más estudiados y con mayor presencia en el suelo son el PCB y PFAS, ello debido a que pueden encontrarse en fases acuáticas o de sedimentos, suelo en concentraciones pequeñas y aun así persistir durante muchos años (Ma Xiao Hong et al., 2018, p.5).

La oxidación y reducción química se emplean comúnmente para la reducción y oxidación de COPs como PCB, ya que, se han presentado logros en porcentajes de eliminación de 80% a 90%, como se muestra en la tabla N°2.

Esta afirmación es corroborada por Bruton T. y Sedlak D., 2017, quienes presentaron en su estudio un porcentaje de eliminación para PFAS del 80 y 90%.

Parenky Akshay et al., 2020, también apoya la afirmación anterior, obteniendo una eliminación del 90% para el compuesto PFAs. Así mismo se encuentra Arvaniti Olga S. et al., 2016 y Blotevogel Jens et al., 2018 con una eliminación del 90 y 70% respectivamente.

En cuanto a la adsorción física de los COPs, se tiene que los PCB son los contaminantes a los que mayormente se emplean, siendo mostrado en la tabla 4. Según Huang Shengyan et al., 2018, la adsorción de PCB con adsorbentes, generalmente carbón activado, es un enfoque de eliminación sensible de acuerdo con el logaritmo de sus fuertes coeficientes de absorción del suelo (por ejemplo, 4.74 a 4.93 estimado para PCB 77.

además, ello es corroborado por los resultados generados en los estudios tanto a escala piloto como a escala de campo, por: McCleaf Philip et al., 2017, quien realizó la adsorción por carbón activado granular para el contaminante PFAS, obteniendo un porcentaje de remoción del 80%.

También, Sorengard Mattias et al., 2019, realizó la adsorción por carbón activado en polvo para el contaminante PFAS, generando un óptimo porcentaje de remoción del 94%.

Lo que es también respaldado por Choi Yongju et al., 2014 y Denyes Mackenzie et al., 2013, quienes eliminaron el PCB con un porcentaje del 97% y 74% respectivamente de acuerdo con las tablas 2 y 4.

Además, autores como Yu Hui et al., (2017), detallan la eficiencia de la biorremediación, señalando que, aunque generalmente, la biorremediación de PCB es un proceso lento que toma desde unas pocas semanas hasta varios meses e incluso años, resulta en una amplia gama de eficiencias (40-90%), especialmente cuando se aplica de manera in situ.

Así también, apoyan la afirmación hecha los siguientes investigadores: Chen C. y He J., 2018, Horváthová H. et al., 2018, Pino N. et al., 2019, Pino Nancy J. et al., 2016, Zhang Weilan et al., 2019, Gobelius Laura et al., 2017.

Además, entre la biorremediación métodos como la fitorremediación para la absorción de PCB u otros COPs se encuentra empleado; es así como lo corroboran Pino N. et al., 2019, con el uso de especies vegetales para la fitorremediación, así mismo Pino Nancy J. et al., 2016, usando Fitorremediación por bioaumentación por cepas libres e inmovilizadas de un consorcio microbiano, utilizando como precursor troncos de aceite de palma y como especies biológicas; plantas de *Avena sativa*, *Brachiaria decumbens*, *Brassica juncea* y *Medicago sativa*.

Apoyando a los autores anteriores se encuentra Zhang Weilan et al., 2019 y Gobelius Laura et al., 2017, quienes usaron la fitorremediación como método de biorremediación, con especies vegetales como *efusiones de Juncus*.

Con respecto al análisis del mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se detalla la tabla N°5.

Tabla N°5: Mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras

Técnica remediadora	Mecanismo de acción	Contaminante (s)	Conc. Inicial (mg / L)	Eliminación (%)	Autor
Biorremediación	Biorremediación por <i>Dehalococcoides mccartyi</i> CG4	PCB (Aroclor 1260)	3	No indica	(Chen C. y He J., 2018)
	Biorremediación por un consorcio bacteriano desarrollado	PCB (Aroclor 1242)	4	85	(Horvát hová H. et al., 2018)
	Fitorremediación por varias especies vegetales	PCB (Aroclor 1260)	73	45-63	(Pino N. et al., 2019)
	Biorremediación electroquímica sinérgica	PCB 61	1	72,6	(Yu Hui et al., 2017)
	Fitorremediación por <i>efusiones de Juncus</i>	PFOS	4.3	10-15	(Zhang Weilan et al., 2019)
	Fitorremediación por varias especies vegetales	PFAS	16-160 mg.kg suelo ⁻¹	No indica	(Gobelius Laura et al., 2017)

	Fitorremediación por bioaumentación por cepas libres e inmovilizadas de un consorcio microbiano, utilizando como precursor troncos de aceite de palma y como especies biológicas; plantas de <i>Avena sativa</i> , <i>Brachiaria decumbens</i> , <i>Brassica juncea</i> y <i>Medicago sativa</i> .	PCB	3	7,2% a 30,3%	(Pino Nancy J. et al., 2016)
Oxidación / reducción química	Oxidación química por reacciones de Fenton.	PCB	3.2	80	(Ma Xiao Hong et al., 2018)
	Oxidación química por persulfato activado.	PCB 28	0,5	98	(Fang Guo Dong et al., 2012)
	Decloración química por ZVI	PCB 153	5	35-45	(Lou Yiling et al., 2019)
	Decloración química por ZVI mediada por tensioactivos	PCB 52	N / A	81,55	(Wu Yingxin et al., 2018)
	Oxidación química por persulfato activado.	PFAS	0,5	80-90	(Bruton T. y Sedlak D., 2017)
	Oxidación química por persulfato activado.	PFAS	10	40-90	(Parenk y Akshay et al., 2020)
	Defluoración química por ZVI	PFAS	0,2	40-90	(Arvaniti Olga S. et al., 2016)
	Defluoración química por ZVI y ZVZn	PFOA	10	30-70	(Blotevo gel Jens et al., 2018)
Adsorción física	Adsorción por biocarbón usando como precursor al pino y como especie	PCB	5	Reducción de los PCB totales	(Gomez Eyles J. y Ghosh

	biológica a la lombriz <i>Lumbriculus variegatus</i>			en el agua de los poros en un 99,6-99,8 %.	E., (2018)
	Adsorción por biocarbón, usando como precursor mezcla de virutas de madera y como especie biológica <i>Folsomia candida</i>	PCB	10	Reducción de la biodisponibilidad y bioaccesibilidad de los PCB (52) en >37 % y >41 %, respectivamente	(Bielská Lucie et al., 2018)
	Adsorción por biocarbón usando como precursor al bambu y como especie biológica a la bacteria (16S rDNA gene)	PCB	2	-PCB en LSOC: 78.93 % -PCB en HSOC: 65.68 %	(Huang Shengyan et al., 2018)
	Biorremediación por biocarbón, reduciendo la biodisponibilidad y la fitodisponibilidad de los PCBs en el suelo, empleando madera mixta como precursor y como especies biológicas Nabos (<i>Eisenia fétida</i>)	PCB	4	63%	(Silvani Ludovic a et al., 2019)
	Adsorción por carbón activado granular	PFAS	484,1	60-80 para PFAS de cadena larga	(McClea f Philip et al., 2017)
	Adsorción por carbón activado en polvo	PFAS	0,6 mg.kg ⁻¹	70-94	(Sorengard Mattias et al., 2019)
	Adsorción por carbón activado	PCB	1,09 mg.kg de sedimento ⁻¹	93-97	(Choi Yongju et al., 2014)
	Adsorción por carbón activado	PCB (Arochlors 1254 y 1260)	71,4 µg.g suelo ⁻¹	64-74	(Denyes Mackenzie et al., 2013)

Elaboración propia

De acuerdo al análisis de las técnicas de remediación de los COPs en el suelo se tiene que los mecanismos de acción de la biorremediación son la descomposición a través de microorganismo; esto es mediante la acción que ejercen los microorganismos en el suelo sobre los COPs; en el caso de la oxidación - reducción química los mecanismos de acción son los procesos de oxidación avanzados (AOP), la cloración y oxidación química; los cuales ejercen una disminución en la toxicidad de los COPs y generan que estos se vuelvan más degradables; por último el mecanismo de acción de la técnica de remediación de adsorción física es la adsorción de los COPs mediante adsorbentes generalmente carbón activado, lo cual permiten una eliminación sostenible.

De acuerdo con Reddy A. et al., (2019, p.3), los PCB con adsorbentes, generalmente carbón activado, es un enfoque de eliminación sensible de acuerdo con el logaritmo de sus fuertes coeficientes de absorción del suelo (por ejemplo, 4.74 a 4.93 estimado para PCB 77. Además, en un estudio a escala de banco se informó una alta eficiencia (70-94% de estabilización) del carbón activado en polvo para la remediación de suelos contaminados con PFAS.

Lo que es corroborado por los autores que emplearon la adsorción física como: Gomez Eyles J. y Ghosh E., 2018, y presentaron un mecanismo de acción de adsorción por biocarbón usando como precursor al pino y como especie biológica a la lombriz *Lumbriculus variegatus*. Al igual que este autor se encuentran, Bielská Lucie et al., 2018, Huang Shengyan et al., 2018, Silvani Ludovica et al., 2019, McCleaf Philip et al., 2017, Choi Yongju et al., 2014 y Denyes Mackenzie et al., 2013.

De acuerdo con Ma Xiao Hong et al., (2018, p.3), en el proceso de oxidación avanzados en los mecanismos de acción de la oxidación - reducción química los radicales hidroxilos atacan a los sustitutos del cloro para reemplazarlos y la velocidad de las reacciones se determina en función de la posición del átomo de cloro.

Por su parte Wu Yingxin et al., (2018, p.1), afirma que estudios recientes han utilizado AOP para la oxidación química de PCB a través de soluciones sintetizadas de la reacción de Fenton o persulfato activado (reacciones 1 y 2) en matraces a escala de laboratorio por lotes. Pero esto es opuesto por Mukherjee Ritika et al., (2016, p.4), quien indica que, aunque se han logrado significativos logros en los porcentajes de eliminación en pocas horas, estos porcentajes de remoción todavía resultan en

concentraciones finales de más de 0.014 mg / L, que es el nivel seguro para la vida acuática cuando existe crónicamente en el medio ambiente.

Por su parte el investigador Lou Yiling et al., (2019, p.2), señala que la eficiencia de esta tecnología aún debe mejorarse para cumplir con las regulaciones ambientales antes de su uso en aplicaciones a gran escala.

Por otro lado, para identificar cuáles son los beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se realizó la tabla N°6.

Tabla N°6: Beneficios de cada técnica remediadora de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo

Técnicas de remediación	Beneficios	Fuentes
Biorremediación	<ul style="list-style-type: none"> -Se considera una tecnología de remediación de bajo costo -De bajo mantenimiento -Respetuosa con el medio ambiente -Sostenible para la limpieza de suelos contaminados -Es eficiente tanto para compuestos orgánicos como inorgánicos -No necesita de un personal especializado para que lo utilice -Presenta ventajas sobre el suelo debido a que favorece en las propiedades fisicoquímicas con la generación de la cubierta vegetal. -Puede ser usado en diferentes recursos del medio ambiente como; agua, suelo y aire. -Incentiva a la generación de reciclado 	(Chen C. y He J., 2018) (Horváthová H. et al., 2018) (Pino N. et al., 2019) (Yu Hui et al., 2017) (Zhang Weilan et al., 2019) (Gobelius Laura et al., 2017) (Pino Nancy J. et al., 2016)
Oxidación y reducción química	<ul style="list-style-type: none"> -Alto potencial de remediación -Conversión de contaminantes orgánicos antropogénicos -Biorrecalcitrantes en compuestos biodegradables -Velocidades de reacción rápidas para la mayoría de los productos químicos -Degradación del contaminante, en lugar de concentrarlo 	(Ma Xiao Hong et al., 2018) (Fang Guo Dong et al., 2012) (Lou Yiling et al., 2019) (Wu Yingxin et al., 2018) (Bruton T. y Sedlak D., 2017) (Parenky Akshay et al., 2020)

	-Capacidad para mineralizar completamente la mayoría de los contaminantes. -No selectivo, capaz de degradar prácticamente cualquier contaminante	(Arvaniti Olga S. et al., 2016) (Blotevogel Jens et al., 2018)
Adsorción física	-Bajo costo -Escalabilidad -Eficacia - Método sencillo y rentable -Benignidad ambiental -Provoca solo un pequeño cambio conformacional de las biomoléculas y no necesita funcionalización de la superficie -La excelente propiedad de transferencia de electrones junto con la biocompatibilidad de los polímeros conductores lo convierte en una plataforma atractiva para la inmovilización de biomoléculas	(Gomez Eyles J. y Ghosh E., 2018) (Bielská Lucie et al., 2018) (Huang Shengyan et al., 2018) (Silvani Ludovica et al., 2019) (McCleaf Philip et al., 2017) (Sorengard Mattias et al., 2019) (Choi Yongju et al., 2014) (Denyes Mackenzie et al., 2013)

Ma Xiao Hong et al., 2018, afirma lo señalado en la tabla 6, presentando como resultados de su estudio que la oxidación de Fenton como técnica de oxidación y reducción química es un medio eficaz y práctico de remediación de suelos muy contaminados con PCB. Lo que es rechazado por Reddy A. et al., (2019, p.3), quien indica que, aunque el uso de tecnologías químicas para la remediación de PCB conduce a porcentajes de eliminación relativamente más altos en comparación con los métodos de biorremediación en menos tiempo, el costo adicional, la incontabilidad y la formación de subproductos activos han limitado sus aplicaciones a solo experimentos a escala de laboratorio.

Además, de acuerdo con Jing ran et al., (2018, p.4), afirma que, en sinergia con la biorremediación, se ha informado que el carbón activado bioaumentado es la tecnología de remediación potencialmente más eficiente para suelos y sedimentos contaminados con PCB.

Pero Mishra M. et al., (2021, p.436), en cuanto a la biorremediación señala que una de sus desventajas o limitaciones comunes son que algunos contaminantes altamente clorados y HAP de alto peso molecular no son fácilmente susceptibles de degradación microbiana, y la degradación microbiana de algunos productos químicos

puede conducir a la producción de intermedios más tóxicos y móviles que los compuestos originales.

Además, Sanz Sáez I. et al., (2018, p.7), presenta cierta oposición a las ventajas mencionadas sobre la biorremediación, haciendo hincapié en que para la biorremediación ex situ, los suelos contaminados deben excavar y trasladarse a otro sitio para su tratamiento, lo que puede resultar en un alto costo, lo que consideraría a la biorremediación no siempre como un método factiblemente económicamente.

Mientras que, el mecanismo de adsorción física suele ser físico, pero también puede ser químico y la adsorción se implementa fácilmente, pero a menudo adolece de cierto grado de reversibilidad y, por lo tanto, produce un recubrimiento que puede eliminarse lentamente durante el funcionamiento o la limpieza de la membrana (Xia L. et al., 2019, p. 196).

Adicionando a lo anteriormente dicho se encuentra Huang Shengyan et al., 2018, quien indica que la adsorción física en los microporos se produce a presiones relativas sustancialmente más bajas que los fenómenos de sorción en los mesoporos, y son necesarios cuidados y requisitos especiales para obtener isothermas de adsorción precisas.

V. CONCLUSIONES

En base al objetivo general del estudio acerca de determinar cuál es la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se puede concluir que la influencia de las diversas técnicas usadas es positiva en el suelo presentando ventajas específicas dependiendo de la técnica remediadora usada, así como su mecanismo de acción; para lo cual se buscó resolver 3 problemas específicos, detallando las conclusiones de cada una a continuación:

1. Las técnicas remediadoras de COP más usados en el suelo son la adsorción física, la oxidación reducción química y la biorremediación; presentando entre las técnicas la oxidación / reducción química y la adsorción física mayor utilización entre los autores, siendo empleado en un porcentaje del 35% cada una, mientras que la biorremediación fue usado por el 30%. Ello es debido a que ambas tecnologías de remediación se encuentran actualmente desarrolladas para el tratamiento y eliminación de los COPs
2. El mecanismo de acción de las diversas técnicas remediadoras son: en la biorremediación, es la descomposición a través de microorganismo; esto es mediante la acción que ejercen los microorganismos en el suelo sobre los COPs; en el caso de la oxidación - reducción química los mecanismos de acción son los AOP, la cloración y oxidación química; los cuales ejercen una disminución en la toxicidad de los COPs y generan que estos se vuelvan más degradables; por último el mecanismo de acción de la técnica de remediación de adsorción física es la adsorción de los COPs mediante adsorbentes generalmente carbón activado, lo cual permiten una eliminación sostenible.
3. Los beneficios de cada técnica remediadora de COP en el suelo son de acuerdo a los costos, al tiempo que se emplee para llevar a cabo la eliminación de COPs, al acceso de su aplicación y al manejo, donde todas las técnicas presentan resultados eficientes para compuestos orgánicos, según lo señalado por los investigadores, pero la variación se encuentra en los costos y el tiempo de empleo, siendo entre todas la biorremediación la más completa, siendo la adsorción física desventajosa en cuanto a tiempo, ya que requiere de meses o hasta años para presentar un porcentaje mayor al 90%, en el caso de la oxidación y reducción los costos no son tan bajos con la biorremediación o adsorción física pero sí presenta un alto potencial de remediación en tiempos cortos y no es selectivo, siendo capaz de degradar prácticamente cualquier contaminante.

VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis de la influencia de las diversas técnicas remediadoras de contaminantes orgánicos persistentes en el suelo se puede concluir de manera general que se profundice en este tipo de investigación y su influencia en la remediación de los COP, siendo comprobado que las fuentes de investigación son limitadas, encontrando escasos estudios a nivel nacional de trabajos previos; es así que, en base a las conclusiones llegadas de cada problema específico planteado se puede recomendar los siguientes puntos:

1. Se recomienda realizar trabajos enfocados a los procesos electroquímicos catalíticos realizados en medio acuoso que se utilizan para mejorar la biodegradabilidad de contaminantes orgánicos persistentes.
2. Así también, en base a los estudios realizados se llegó a la conclusión que las propiedades fisicoquímicas de los COPs presentes en el medio ambiente no son estudiados, para lo cual se recomienda utilizar estudios experimentales con modelos cuantitativos para determinarla, ya que con ello se puede predecir el destino ambiental y transporte de productos químicos.
3. Así también se recomienda realizar estudios para analizar los parámetros de remediación de las diversas técnicas usadas para la descontaminación de los COPs en el medio acuoso, ya que existen pocos estudios enfocados en la contaminación del agua por COPs.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABUJABHAH, Ibrahim S., et al. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2016, vol. 98, p. 243-253. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.021>
2. ADETONA, Olorunfemi, et al. Hydroxylated polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure to wood smoke in wildland firefighters. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2017, vol. 27, no 1, p. 78-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/jes.2015.75>
3. ADHIKARI, S. P.; LACHGAR, A. Effect of particle size on the photocatalytic activity of BiNbO₄ under visible light irradiation. En *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2016. p. 012017.
4. AGNELLO, Ana Carolina, et al. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 563, p. 693-703. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
5. Allen, DT, Shonnard, DR, 2020. CompTox Chemicals Dashboard, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Disponible en: <https://comptox.epa.gov/dashboard>
6. AMBER, Mazia, et al. Effects of Defined Mixtures of Persistent Organic Pollutants (POPs) on Pre-lethal Cytotoxicity in the Human A-498 Kidney Cell Line In Vitro. *Exposure and Health*, 2021, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12403-021-00396-7>
7. ANDRADE, Deborah Cordeiro; DOS SANTOS, Elisama Vieira. Combination of electrokinetic remediation with permeable reactive barriers to remove organic compounds from soils. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, vol. 22, p. 136-144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.06.002>
8. ANGELES, Luisa F.; AGA, Diana S. Catching the elusive persistent and mobile organic compounds: novel sample preparation and advanced analytical

- techniques. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2020, vol. 25, p. e00078. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00078>
9. ANTUNES, I. M. H. R., et al. Potential risk assessment in stream sediments, soils and waters after remediation in an abandoned W> Sn mine (NE Portugal). Ecotoxicology and environmental safety, 2016, vol. 133, p. 135-145.
 10. ARVANITI, Olga S., et al. Reductive degradation of perfluorinated compounds in water using Mg-aminoclay coated nanoscale zero valent iron. Chemical Engineering Journal, 2015, vol. 262, p. 133-139. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.079>
 11. ASHRAF, Muhammad Aqeel. Persistent organic pollutants (POPs): a global issue, a global challenge. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5225-9>
 12. AWAD, Abdelrahman M., et al. Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: a comprehensive review. Separation and Purification Technology, 2019, vol. 228, p. 115719. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115719>
 13. BABUT, Marc, et al. Monitoring priority substances in biota under the Water Framework Directive: how effective is a tiered approach based on caged invertebrates? A proof-of-concept study targeting PFOS in French rivers. Environmental Sciences Europe, 2020, vol. 32, no 1, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00416-4>
 14. BAROT, Megha; KUMAR, Nirmal. Remediation action on persistent organic pollutants by wonder weeds and associated microbiomes. En Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants. Woodhead Publishing, 2021. p. 355-368. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00026-2>
 15. BELPAIRE, Claude, et al. Advies over de toestand van de Europese paling in Vlaanderen. 2020.
 16. BIELSKÁ, Lucie, et al. Sorption, bioavailability and ecotoxic effects of hydrophobic organic compounds in biochar amended soils. Science of the total

- environment, 2018, vol. 624, p. 78-86. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.098>
17. BLOTEVOGEL, Jens; GIRAUD, Robert J.; BORCH, Thomas. Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by zero-valent iron and zinc: A DFT-based kinetic model. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 335, p. 248-254. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.131>
18. BRUTON, Thomas A.; SEDLAK, David L. Treatment of aqueous film-forming foam by heat-activated persulfate under conditions representative of in situ chemical oxidation. *Environmental Science & Technology*, 2017, vol. 51, no 23, p. 13878-13885. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03969>
19. CATTEAU, Audrey, et al. Water quality of the Meuse watershed: Assessment using a multi-biomarker approach with caged three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 208, p. 111407. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111407>
20. CHAKRABORTY, Jaya; DAS, Surajit. Molecular perspectives and recent advances in microbial remediation of persistent organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 17, p. 16883-16903. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6887-7>
21. CHEN, Chen; HE, Jianzhong. Strategy for the rapid dechlorination of polychlorinated biphenyls (PCBs) by *Dehalococcoides mccartyi* strains. *Environmental science & technology*, 2018, vol. 52, no 23, p. 13854-13862. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03198>
22. CHOI, Yongju; CHO, Yeo-Myoung; LUTHY, Richard G. In situ sequestration of hydrophobic organic contaminants in sediments under stagnant contact with activated carbon. 1. Column studies. *Environmental science & technology*, 2014, vol. 48, no 3, p. 1835-1842. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es403335g>
23. COLINO, Clara I.; LANA O, José M.; GUTIÉRREZ-MILLÁN, Carmen. Recent advances in functionalized nanomaterials for the diagnosis and treatment of

- bacterial infections. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, p. 111843. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111843>
24. DENYES, Mackenzie J.; RUTTER, Allison; ZEEB, Barbara A. In situ application of activated carbon and biochar to PCB-contaminated soil and the effects of mixing regime. *Environmental pollution*, 2013, vol. 182, p. 201-208. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.016>
25. ENGELSMAN, Michelle, et al. Biomonitoring in firefighters for volatile organic compounds, semivolatile organic compounds, persistent organic pollutants, and metals: A systematic review. *Environmental Research*, 2020, vol. 188, p. 109562. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109562>
26. FANG, Guo-Dong, et al. Sulfate radical-based degradation of polychlorinated biphenyls: effects of chloride ion and reaction kinetics. *Journal of hazardous materials*, 2012, vol. 227, p. 394-401. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.074>
27. GAFOOR, Abdul, et al. Elimination of nickel (II) ions using various natural/modified clay minerals: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37, p. 2033-2040. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.500>
28. GOBELIUS, Laura; LEWIS, Jeffrey; AHRENS, Lutz. Plant uptake of per-and polyfluoroalkyl substances at a contaminated fire training facility to evaluate the phytoremediation potential of various plant species. *Environmental science & technology*, 2017, vol. 51, no 21, p. 12602-12610. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02926>
29. GOMEZ-EYLES, Jose L.; GHOSH, Upal. Enhanced biochars can match activated carbon performance in sediments with high native bioavailability and low final porewater PCB concentrations. *Chemosphere*, 2018, vol. 203, p. 179-187. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.132>
30. HORVÁTHOVÁ, Hana; LÁSZLOVÁ, Katarína; DERCOVÁ, Katarína. Bioremediation of PCB-contaminated shallow river sediments: the efficacy of biodegradation using individual bacterial strains and their consortia.

- Chemosphere, 2018, vol. 193, p. 270-277. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.012>
31. HUANG, Zhenzhen; LEE, Hian Kee. Micro-solid-phase extraction of organochlorine pesticides using porous metal-organic framework MIL-101 as sorbent. *Journal of Chromatography A*, 2015, vol. 1401, p. 9-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.04.052>
32. HUANG, Shengyan, et al. Dynamic changes of polychlorinated biphenyls (PCBs) degradation and adsorption to biochar as affected by soil organic carbon content. *Chemosphere*, 2018, vol. 211, p. 120-127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.133>
33. JING, Ran; FUSI, Soliver; KJELLERUP, Birthe V. Remediation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in contaminated soils and sediment: state of knowledge and perspectives. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, vol. 6, p. 79. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00079>
34. KALLAWAR, Gauri A.; BARAI, Divya P.; BHANVASE, Bharat A. Bismuth titanate based photocatalysts for degradation of persistent organic compounds in wastewater: A comprehensive review on synthesis methods, performance as photocatalyst and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2021, p. 128563. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128563>
35. KUCHARZYK, Katarzyna H., et al. Novel treatment technologies for PFAS compounds: A critical review. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 204, p. 757-764. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.016>
36. LI, Jun, et al. Source identification and health risk assessment of Persistent Organic Pollutants (POPs) in the topsoils of typical petrochemical industrial area in Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 158, p. 177-185. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.07.014>
37. LIU, Shuting, et al. Critical Influences of Metal Compounds on the Formation and Stabilization of Environmentally Persistent Free Radicals. *Chemical Engineering Journal*, 2021, p. 131666. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131666>

38. LORETO-GÓMEZ, Carmen, et al. Prenatal exposure to persistent organic compounds and their association with anogenital distance in infants. *Reproductive biomedicine online*, 2018, vol. 37, no 6, p. 732-740. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2018.09.008>
39. LORETO-GÓMEZ, Carmen, et al. Anogenital distance: a longitudinal evaluation of its variants and indices in boys and girls of Sonora, Mexico. *Reproductive Toxicology*, 2017, vol. 73, p. 167-174. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.08.011>
40. LOU, Yiling, et al. Interaction between pollutants during the removal of polychlorinated biphenyl-heavy metal combined pollution by modified nanoscale zero-valent iron. *Science of the total environment*, 2019, vol. 673, p. 120-127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.064>
41. LUO, Jin, et al. Dehalogenation of persistent halogenated organic compounds: A review of computational studies and quantitative structure–property relationships. *Chemosphere*, 2015, vol. 131, p. 17-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.013>
42. LUO, Shuang, et al. A novel model to predict gas–phase hydroxyl radical oxidation kinetics of polychlorinated compounds. *Chemosphere*, 2017, vol. 172, p. 333-340. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.014>
43. MA, Xiao-Hong, et al. Enhanced Fenton degradation of polychlorinated biphenyls in capacitor-oil-contaminated soil by chelating agents. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 333, p. 370-379. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.167>
44. Manisha Mishra, Sandeep Kumar Singh, Ajay Kumar. *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2021, Pages 435-445. Role of omics approaches in microbial bioremediation. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00036-5>
45. MATTHIES, Michael, et al. The origin and evolution of assessment criteria for persistent, bioaccumulative and toxic (PBT) chemicals and persistent organic

- pollutants (POPs). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, vol. 18, no 9, p. 1114-1128. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6EM00311G>
46. MCCLEAF, Philip, et al. Removal efficiency of multiple poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water using granular activated carbon (GAC) and anion exchange (AE) column tests. *Water research*, 2017, vol. 120, p. 77-87. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.057>
47. MUKHERJEE, Ritika, et al. A review on synthesis, characterization, and applications of nano zero valent iron (nZVI) for environmental remediation. *Critical reviews in environmental science and technology*, 2016, vol. 46, no 5, p. 443-466. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1103832>
48. PARENKY, Akshay Chandrashekar, et al. Decomposition of carboxylic PFAS by persulfate activated by silver under ambient conditions. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, vol. 146, no 10, p. 06020003.
49. PAYNE, Rayford B., et al. A pilot-scale field study: in situ treatment of PCB-impacted sediments with bioamended activated carbon. *Environmental science & technology*, 2019, vol. 53, no 5, p. 2626-2634. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05019>
50. PINO, Nancy J.; MÚNERA, Luisa M.; PEÑUELA, Gustavo A. Phytoremediation of soil contaminated with PCBs using different plants and their associated microbial communities. *International journal of phytoremediation*, 2019, vol. 21, no 4, p. 316-324. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524832>
51. PINO, Nancy J.; MUÑERA, Luisa M.; PEÑUELA, Gustavo A. Bioaugmentation with immobilized microorganisms to enhance phytoremediation of PCB-contaminated soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2016, vol. 25, no 4, p. 419-430. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2016.1148010>
52. POCHODYLO, Amy L.; HELBLING, Damian E. Emerging investigators series: prioritization of suspect hits in a sensitive suspect screening workflow for comprehensive micropollutant characterization in environmental samples.

Environmental Science: Water Research & Technology, 2017, vol. 3, no 1, p. 54-65. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6EW00248J>

53. POZO, Karla, et al. Passive air sampling of persistent organic pollutants (POPs) and emerging compounds in Kolkata megacity and rural mangrove wetland Sundarban in India: An approach to regional monitoring. Chemosphere, 2017, vol. 168, p. 1430-1438. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.055>
54. RAHMAN, Nur Ruzaina Abdul, et al. Detailed photocatalytic study of alkaline titanates and its application for the degradation of methylene blue (MB) under solar irradiation. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2019, vol. 375, p. 219-230. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.020>
55. REDDY, A. Vijaya Bhaskar; MONIRUZZAMAN, M.; AMINABHAVI, Tejraj M. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. Chemical Engineering Journal, 2019, vol. 358, p. 1186-1207. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2018.09.205>
56. REYNAERT, Eva, et al. Practical implementation of true on-site water recycling systems for hand washing and toilet flushing. Water research X, 2020, vol. 7, p. 100051. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100051>
57. ROCHA, I. M. V., et al. Coupling electrokinetic remediation with phytoremediation for depolluting soil with petroleum and the use of electrochemical technologies for treating the effluent generated. Separation and Purification Technology, 2019, vol. 208, p. 194-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.012>
58. SABERI, Nima, et al. Simultaneous removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and heavy metals from an artificial clayey soil by enhanced electrokinetic method. Journal of environmental management, 2018, vol. 217, p. 897-905. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.125>
59. Salom Gnana Thanga Vincent, Tim Jennerjahn, Kumarasamy Ramasamy. Chapter 5 - Biodegradation and biotransformation of persistent organic

pollutants by microbes in coastal sediments. *Microbial Communities in Coastal Sediments*. 2021, Pages 147-166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815165-5.00005-4>

60. SAMADI, Aryan; POUR, Azadeh Kermanshahi; JAMIESON, Rob. Development of remediation technologies for organic contaminants informed by QSAR/QSPR models. *Environmental Advances*, 2021, p. 100112. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100112>
61. SÁNCHEZ, Virtudes, et al. Enhancing the removal of atrazine from soils by electrokinetic-assisted phytoremediation using ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Chemosphere*, 2019, vol. 232, p. 204-212. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.216>
62. SANDU, Ciprian, et al. Electrokinetic oxidant soil flushing: a solution for in situ remediation of hydrocarbons polluted soils. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, vol. 799, p. 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.05.036>
63. SANZ-SÁEZ, Isabel, et al. Bacterias marinas detoxificadoras de metilmercurio: caracterización mediante aislamiento y técnicas-ómicas. 2018.
64. SCHWEITZER, Linda; NOBLET, James. Water contamination and pollution. En *Green chemistry*. Elsevier, 2018. p. 261-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00011-X>
65. SHAN, Yongping, et al. Electrokinetic effects on the interaction of phenanthrene with geo-sorbents. *Chemosphere*, 2020, vol. 242, p. 125161. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125161>
66. SILVANI, Ludovica, et al. Can polyethylene passive samplers predict polychlorinated biphenyls (PCBs) uptake by earthworms and turnips in a biochar amended soil?. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 662, p. 873-880. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.202>
67. SONG, Biao, et al. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and

- heavy metals. *Environment international*, 2017, vol. 105, p. 43-55. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.001>
68. SÖRENGÅRD, Mattias, et al. Electrodialytic per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) removal mechanism for contaminated soil. *Chemosphere*, 2019, vol. 232, p. 224-231. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.088>
69. SU, Zhiguo, et al. Sediment bacterial community structures and their predicted functions implied the impacts from natural processes and anthropogenic activities in coastal area. *Marine pollution bulletin*, 2018, vol. 131, p. 481-495. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.052>
70. TSAKIROGLOU, Christos, et al. Assessing the capacity of zero valent iron nanofluids to remediate NAPL-polluted porous media. *Science of The Total Environment*, 2016, vol. 563, p. 866-878. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.010>
71. TEUNEN, Lies, et al. Effect of abiotic factors and environmental concentrations on the bioaccumulation of persistent organic and inorganic compounds to freshwater fish and mussels. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 799, p. 149448. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149448>
72. USEPA, Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutantsglobal-issue-global-response>, accessed June, 2016
73. VICKERS, Neil J. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?. *Current biology*, 2017, vol. 27, no 14, p. R713-R715. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.064>
74. VINCENT, Salom Gnana Thanga; JENNERJAHN, Tim C.; RAMASAMY, Kumarasamy. *Microbial Communities in Coastal Sediments: Structure and Functions*. Elsevier, 2021. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=bxExEAAAQBAJ&lpg=PP1&ots=z9BpaoTtAg&dq=Biodegradation%20and%20biotransformation%20of%20persiste>

[nt%20organic%20pollutants%20by%20microbes%20in%20coastal%20sediments&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Biodegradation%20and%20biotransformation%20of%20persistent%20organic%20pollutants%20by%20microbes%20in%20coastal%20sediments&f=false](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125325)

75. WAGNER, Michal, et al. Metal-organic frameworks for pesticidal persistent organic pollutants detection and adsorption—A mini review. *Journal of hazardous materials*, 2021, p. 125325. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125325>
76. WANG, Dali, et al. Gut Microbial Profiles in *Nereis succinea* and Their Contribution to the Degradation of Organic Pollutants. *Environmental science & technology*, 2020, vol. 54, no 10, p. 6235-6243. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07854>
77. WANG, Yafen; TAM, Nora FY. Microbial Remediation of organic pollutants. En *World Seas: An Environmental Evaluation*. Academic Press, 2019. p. 283-303. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00016-4>
78. ZHANG, Weilan, et al. Exposure of *Juncus effusus* to seven perfluoroalkyl acids: uptake, accumulation and phytotoxicity. *Chemosphere*, 2019, vol. 233, p. 300-308. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.258>
79. WILSON, Jodie, et al. Effects of defined mixtures of persistent organic pollutants (POPs) on multiple cellular responses in the human hepatocarcinoma cell line, HepG2, using high content analysis screening. *Toxicology and applied pharmacology*, 2016, vol. 294, p. 21-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.01.001>
80. WILSON, Jodie, et al. Do persistent organic pollutants interact with the stress response? Individual compounds, and their mixtures, interaction with the glucocorticoid receptor. *Toxicology letters*, 2016, vol. 241, p. 121-132. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.11.014>
81. WU, Yingxin, et al. Surfactant-facilitated dechlorination of 2, 2', 5, 5'-tetrachlorinated biphenyl using zero-valent iron in soil/sediment solution: Integrated effects of plausible factors. *Chemosphere*, 2018, vol. 212, p. 845-852. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.113>

82. Xia, L., Vemuri, B., Saptoka, S., Shrestha, N., Chilkoor, G., Kilduff, J., & Gadhamshetty, V. (2019). Antifouling Membranes for Bioelectrochemistry Applications. *Microbial Electrochemical Technology*, 195–224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64052-9.00008-x>
83. YADAV, Ishwar Chandra, et al. Current status of persistent organic pesticides residues in air, water, and soil, and their possible effect on neighboring countries: A comprehensive review of India. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 511, p. 123-137. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.041>
84. YU, Hui, et al. Microbial polychlorinated biphenyl dechlorination in sediments by electrical stimulation: The effect of adding acetate and nonionic surfactant. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 580, p. 1371-1380. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.102>
85. YU, Jie, et al. Efficient degradation of chloramphenicol by zero-valent iron microspheres and new insights in mechanisms. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, vol. 256, p. 117876. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117876>
86. YUAN, Jintao, et al. QSPR models for predicting generator-column-derived octanol/water and octanol/air partition coefficients of polychlorinated biphenyls. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, vol. 128, p. 171-180. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.022>
87. ZAHN, Daniel; FRÖMEL, Tobias; KNEPPER, Thomas P. Halogenated methanesulfonic acids: A new class of organic micropollutants in the water cycle. *Water research*, 2016, vol. 101, p. 292-299. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.082>
88. ZHONG, Wenjue, et al. Probing mechanisms for bioaccumulation of perfluoroalkyl acids in carp (*Cyprinus carpio*): Impacts of protein binding affinities and elimination pathways. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 647, p. 992-999. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.099>

89.ZOPPINI, Annamaria, et al. Bacterial diversity and microbial functional responses to organic matter composition and persistent organic pollutants in deltaic lagoon sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, vol. 233, p. 106508. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106508>

ANEXO

Anexos N° 1:

	FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR:		
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION
TIPO DE INVESTIGACION:		
CÓDIGO:		
PALABRAS CLAVES :		
TÉCNICAS REMEDIADORAS:		
MECANISMO DE ACCIÓN:		
BENEFICIOS DE CADA TÉCNICA REMEDIADORA:		
RESULTADOS :		
CONCLUSIONES:		

Elaboración propia



Declaratoria de Originalidad de los Autores

Yo, Serrano Vera Abigail Marilu estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al Trabajo de Investigación / Tesis titulado: " Mecanismo de Acción de Diversas Técnicas Remediadoras de Contaminantes Orgánicos Persistentes en el Suelo: Revisión Sistemática", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que el Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico otítulo profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Lima 08 de diciembre de 2021

Apellidos y Nombres del Autor	Firma
Serrano Vera Abigail Marilu DNI: 48305442 ORCID: 0000-0002-1582-4446	